

文章编号: 1005-5630(2015)06-0479-05

## 絮凝池流场量测技术的研究

程雅雯, 詹咏, 杨亚科, 夏瑞, 张宇翔, 钱祥林

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对往复隔板絮凝池廊道狭窄, 水流拐弯处涡漩流场量测十分困难的问题, 采用室内模拟、现场中试和数值模拟三种量测手段, 对其流场进行了研究。采用粒子图像测速技术, 建立了二维水流数学模型, 得到不同边界条件对流场水力状况影响的流场粒子图像。由现场中试可知, 改进后的絮凝池混凝效果明显好转, 微小涡漩增多, 可以达到高效混凝, 并且模拟实验可与物模实验所得结果相互验证。

**关键词:** 往复隔板絮凝池; 现场中试; 粒子图像测速; 数值模拟

**中图分类号:** X 5 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.003

### Study on measurement technology of the flow field in the flocculation tank

CHENG Yawen, ZHAN Yong, YANG Yake, XIA Rui, ZHANG Yuxiang, QIAN Xianglin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** It is very difficult to measure the full flow field because of narrow gallery and complex hydraulic flow pattern on the corner in the reciprocating baffled flocculation tank. The particle image velocimetry and middle field tests and numerical simulation are used. This paper uses an advanced particle image velocimetry technology, and develops a two-dimensional numerical model. It can be seen clearly that the improvement of hydraulic conditions of flow field in the different boundary conditions through the flow particle image. By means of the middle field tests, coagulation effect has improved significantly in the improved flocculation, and the addition of tiny eddies can achieve effective flocculation. The comparison shows that the numerical results are in agreement with the experiment results of the flocculation tank.

**Keywords:** reciprocating baffled flocculation tank; middle field tests; particle image velocimetry; numerical simulation

### 引 言

絮凝池是进行混凝沉淀的主要设备, 而往复隔板絮凝池的应用历史很长, 积累了许多运行经验, 效果有保证, 成为大中型水厂常选用的一种絮凝池。但它在水流转角处能量消耗太大, 不利于结成比较密实的矾花颗粒<sup>[1-3]</sup>。本文以江苏某水厂净水车间 11 个廊道的往复隔板絮凝池的改造工程为例, 将传统絮凝

收稿日期: 2015-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51279108); 上海大学生创新创业训练计划(SH2014122、SH201510252117); 上海市科委基础研究重大项目(13DJ1400105); 宁波市社会发展科技项目(2012C50038); 沪江基地研究专项(B14003)

作者简介: 程雅雯(1994—), 女, 本科生, 主要从事水污染控制工程的研究。E-mail: 864713112@qq.com

通信作者: 詹咏(1971—), 女, 副教授, 主要从事水污染控制工程的研究。E-mail: jannet6@163.com

池拐角及隔板断面设计成圆弧形,可以克服该絮凝池由于水流条件不理想所造成的水头损失过大、能量分配不合理等问题。本文采用室内模拟测试、现场中试与数值模拟相结合的方法,对传统絮凝池与改进后絮凝池的水流流场进行了分析研究。

### 1 室内模拟测试

从涡漩运动对混凝的影响<sup>[1]</sup>可知:由于不同边壁形状可以形成不同的水流结构,将传统絮凝池隔板断面及拐角设计成圆弧形,可明显提高混凝沉淀效果。这必需通过流场的实测资料来证实边壁形状对水流结构的影响,因为往复隔板絮凝池拐弯处水流结构较复杂且廊道狭窄,故决定采用非接触式测试技术对其流场进行量测。粒子图像测速(简称 PIV)技术对流场的干扰非常小,据文献[3-6]分析该技术的空间分辨率及精度都比较高,适应涡漩运动较复杂的狭窄流场的量测工作。故本文在室内实验中采用 PIV 技术量测往复隔板絮凝池的涡漩流场。实验测试系统由往复隔板絮凝池流场模拟系统和 PIV 测速系统组成,如图 1 所示。

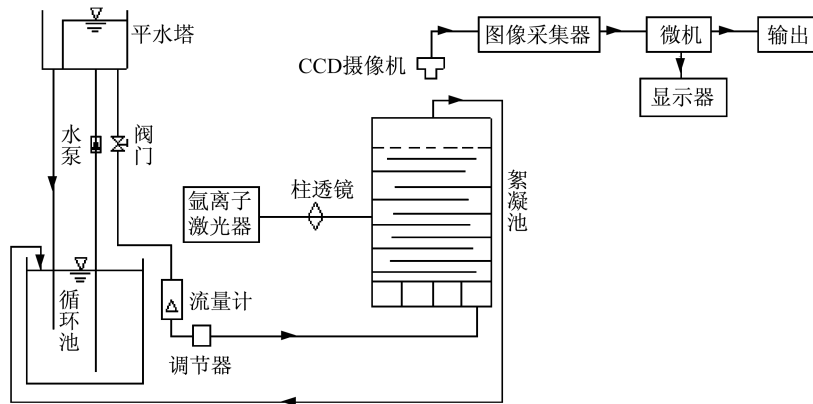


图 1 测试系统实验装置

Fig. 1 Experiment device of the test system

在廊道拐弯处一端形状为矩形的是传统往复隔板絮凝池的隔板,且廊道拐弯角也是直角(方案一)。将方案一絮凝池第二段以后的隔板断面及拐弯角同时设计为圆弧形(方案二),如图 2 所示。图 3 为两种方案中第五廊道流场的粒子图像。由方案二可知:水流拐弯处由众多的涡漩组成,基于涡漩固有的扩散性,无数大小各异的涡漩相互渗透,互换能量,此处的液体压强迅速降低,而速度梯度却急剧增大,这有利于颗粒之间的相互碰撞。对两种絮凝池拐弯处进行比较可知,方案二水流绕流圆弧界面前后的形状阻力比摩擦阻力大得多,在絮凝池的后部,水流速度较低,可忽略摩擦阻力,涡漩运动引起的扩散作用产生了众多大小相套的复杂涡漩,与池壁的多次碰撞促进了水流中微小涡漩的形成,与大尺度涡漩相比,小尺度涡漩半径越小,旋转半径越小。此时,离心作用加强,运动变快,速度梯度增大,水力状况明显改善,拐弯处的死水区基本消除了。

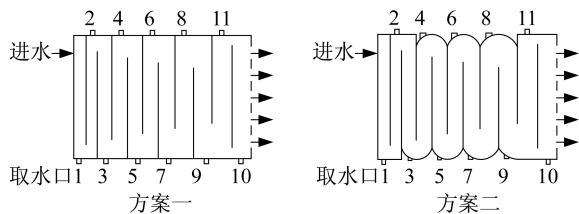


图 2 絮凝池模型示意图

Fig. 2 Flocculation tank model

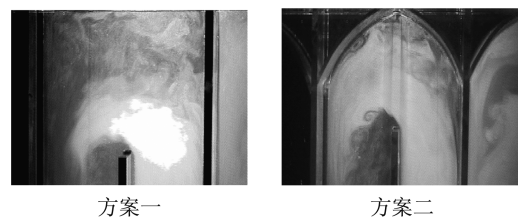


图 3 不同方案水流涡漩粒子图像

Fig. 3 Different eddy motion flow particle images

## 2 现场中试研究

通过现场中试,对不同方案中十一个廊道的不同絮凝阶段的混凝效果及水质浊度做了对比,并对他们的水头损失进行了量测与计算,表1为进水流量 $56.2\text{ m}^3/\text{h}$ ,加矾量为 $15\text{ mg/L}$ ,原水浊度约 $78\text{ NTU}$ 的测试数据,方案一和方案二沉淀池出水浊度分别为 $18\text{ NTU}$ 和 $12.5\text{ NTU}$ 。表格中 $V_i$ 表示廊道流速; $V_{it}$ 表示拐弯流速; $t_i$ 表示水流时间; $h_i$ 表示水头损失; $G_i$ 表示速度梯度; $N_i$ 表示水质浊度。

表1 两种方案絮凝池测试结果的比较

Tab. 1 Comparison of two flocculation tank test results

方案	廊道	$V_i/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{it}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_i/\text{s}$	$h_i/\text{cm}$	$G_i/\text{s}^{-1}$	$N_i/\text{NTU}$	矾花性状
方案一	1	20.44	16.35	18	0.48	56	71.0	形成
	2	18.92	14.76	19	0.39	46	67.0	形成
	3	15.73	12.27	23	0.26	35	61.1	形成
	4	15.59	12.16	23	0.26	30	57.0	碎小
	5	13.54	10.29	26	0.18	25	53.4	细小
	6	13.44	10.08	26	0.17	21	47.3	细小
	7	11.91	8.81	29	0.13	18	38.3	大而疏松
	8	11.42	8.45	30	0.12	17	40.1	大而疏松
	9	11.13	8.24	31	0.11	14	41.5	大而疏松
	10	6.10		19	0.06	11	30.8	较大
	11	8.63		40	0.13	9	25.5	较大
方案二	1	21.55	17.46	17	0.47	60	70.0	形成
	2	19.07	15.26	19	0.38	52	63.3	形成
	3	16.38	12.78	22	0.21	40	52.0	细小
	4	16.23	12.66	22	0.20	34	41.4	细小
	5	13.97	10.62	25	0.14	28	36.8	小而密实
	6	13.61	10.34	25	0.13	24	30.5	小而密实
	7	11.91	9.05	27	0.10	21	25.7	小而密实
	8	11.77	8.83	26	0.09	18	22.6	大而密实
	9	11.37	8.45	25	0.07	16	19.5	大而密实
	10	6.48		16	0.02	14	15.5	大而密实
	11	8.91		37	0.08	13	14.9	大而密实

由表1和室内模拟测试可知,方案一水流流经拐弯角时,速度急剧变小,此时消耗的能量大但并不利于矾花的成长。在 $180^\circ$ 的急剧转弯时,颗粒之间的碰撞几率虽然会增加,但速度梯度不合理,此时絮凝池前部速度梯度过小,颗粒碰撞效率不高,而后部拐弯处的速度梯度过高,撞击过大,易击碎已聚集好的矾花。在廊道中后部拐弯处易出现“死水区”,结果导致絮体颗粒密实程度不一,大而疏松的絮体容易被击碎,致使水质浊度极不稳定。这样造成在设计时间内,碎小的矾花流入到沉淀池,出水效果不理想。在未进入沉淀池之前,密实的矾花过早地沉积在絮凝池的后部,在最末端的廊道中形成了堆积的沙丘状沉积物,此时水流通道被阻碍,混凝沉淀效果降低。如果将末端廊道封闭,虽可以缩短混凝时间,但疏松的矾花也易过早进入沉淀池,更易使出水恶化。如果要解决这些问题,又要保持原有絮凝池流程的简单实用,同时还要降低水厂的改造成本,就需要采用方案二。方案二可使水流处于均匀分布的微涡流紊流状态,反应池内絮体变化明显,形成的矾花光滑密实且大小均匀,沉降性能得以提高,出水水质良好,能量利用合理,可降低不必要的水头损失,速度梯度变化平缓,流速分布合理,反应时间变短,絮凝池容积有效利用率提高,混凝效果改善明显。

### 3 数值模拟

由粒子图像测速结果和理论分析可知,不同形状拐角的往复隔板絮凝池其水流结构也不相同。由于在水流拐弯处的流场非常复杂,在此建立二维水流数学模型,以便对整个流场的状况进行预测。正交曲线坐标系下的平面二维水流数学模型可保证良好的网格正交性能,且疏密易于控制。正交曲线网格方程为:

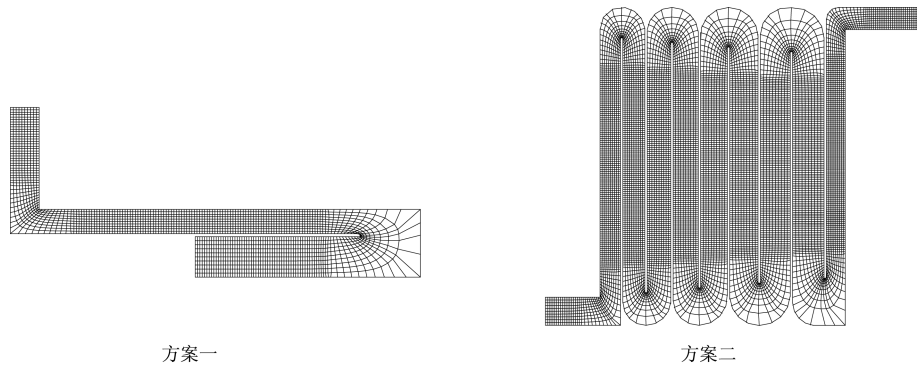
$$\begin{cases} \alpha x_{\xi} + \gamma x_{\eta} + J^2(x_{\xi}p + x_{\eta}q) = 0 \\ \alpha y_{\xi} + \gamma y_{\eta} + J^2(y_{\xi}p + y_{\eta}q) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{\xi}$ 、 $x_{\eta}$ 分别为水平方向的一维和二维恒定均匀流的流函数; $x_{\eta}$ 、 $x_{\eta}$ 分别为水平方向的一维和二维恒定均匀流的压力势函数; $y_{\xi}$ 、 $y_{\eta}$ 分别为垂直方向的一维和二维恒定均匀流的流函数; $y_{\eta}$ 、 $y_{\eta}$ 分别为垂直方向的一维和二维恒定均匀流的压力势函数; $\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$ ;  $\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ ;  $J$ 为 Jacobi 数; $p$ 、 $q$ 为控制函数。

式(1)离散形式为:

$$\begin{cases} (\alpha + J^2 p)x_{i+1,j} - 2[(\alpha + \gamma) + J^2(p + q)]x_{i,j} + \alpha x_{i-1,j} + (\gamma + J^2 q)x_{i,j+1} + \gamma x_{i,j-1} = 0 & i = 1, 2, 3, \dots \\ (\alpha + J^2 p)y_{i+1,j} - 2[(\alpha + \gamma) + J^2(p + q)]y_{i,j} + \alpha y_{i-1,j} + (\gamma + J^2 q)y_{i,j+1} + \gamma y_{i,j-1} = 0 & j = 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (2)$$

通过给出合理的网格点初始值,可用式(2)进行迭代计算。由于絮凝池流场底坡比较规则,可在确定边界点的基础上自动生成初始网格,计算完成后再根据底坡高程与平面坐标的关系求出相应网格点处的底坡高程的插值。最终可生成正交性能良好、疏密有致的网格,对絮凝池的边界<sup>[6-11]</sup>拟合良好,工作量既可减量且精度又得以保证。如图 4 所示,网格尺度的横向变化范围为 0.12~0.20 m,纵向范围为 0.13~0.3 m,共有 13 024 个网格节点。



方案一

方案二

图 4 絮凝池计算网

Fig. 4 Calculation of flocculation tank

本数模采用江苏某水厂往复隔板絮凝池原型的实测水位、流量作为验证条件,其中流量为 3 125 m<sup>3</sup>/h,絮凝池进口池深 1.9 m,出口池深 2.7 m。图 5 是第五廊道不同方案的流场分布图,表 2 是水位验证的结果,水位的模型计算与实测值能良好地吻合。通过往复隔板絮凝池流场的数学模拟,既可对该流场进行预测,又可与物模实验的结果相互验证。

### 4 结 论

(1) 采用 PIV 技术对传统絮凝池流场进行了量测,可解释不同边壁形状对水流结构所产生的影响原因,以及水流涡漩结构对混凝沉淀反应的影响效果,促使人们对混凝沉淀和涡漩运动有更深入的认识。

(2) 本文在保持原有水处理构筑物流程简单实用和降低水厂改造成本的基础上,对传统的往复隔板絮凝池进行了现场中试研究。结果表明,方案二絮凝池流场的流速分布合理,缩短了反应时间,减

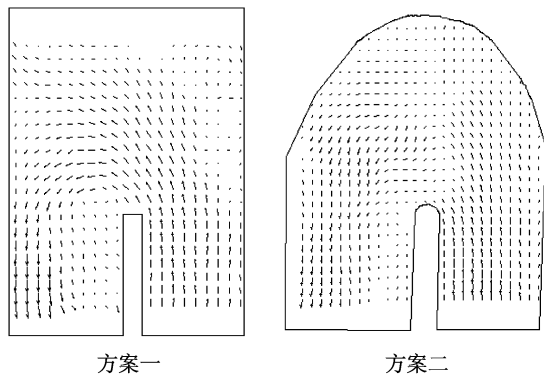


图5 第5廊道流场分布图

Fig. 5 The map of the 5th gallery flow field

表2 水位验证表

Tab. 2 Validation table of water level

廊道	实测值/m	模拟值/m
1	1.91	1.92
2	2.00	2.00
3	2.09	2.11
4	2.16	2.17
5	2.24	2.26
6	2.33	2.34
7	2.40	2.41
8	2.48	2.49
9	2.58	2.60
10	2.66	2.68
11	2.72	2.75

少了在圆弧拐弯处的能量损失,速度梯度平缓,尤其是微小涡流的增多可达到高效混凝。往复隔板絮凝池边壁形状的圆弧化可改变水流紊动在混凝沉淀中的作用。

(3) 将拟合坐标下的二维水流数学模型应用于不同边壁形状的往复隔板絮凝池流场计算中,可对絮凝池全流场进行预测。

### 参考文献:

- [1] 詹咏,何玉武,曾小磊. 混凝控制指标下涡流运动对混凝影响的研究[J]. 上海理工大学学报,2011,33(4):401-404.
- [2] ZHANG H,SHI W D,CHEN B, et al. Experimental study of flow field in interference area between impeller and guide vane of axial flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014,26(6): 894-901.
- [3] 吴玮. PIV 粒子测速技术在污水排海管道内流研究中的应用[J]. 实验流体力学,2013,27(5):25-32.
- [4] 汪显东,陈晔. 水力旋流器内部流场 PIV 测试与分析[J]. 价值工程,2011,30(14):51-52.
- [5] 吴贤芳,刘厚林,杨洪滨,等. 基于粒子图像测速的离心泵叶轮内流动分离测试与分析[J]. 农业工程学报,2014,30(20):51-57.
- [6] LIU H L,WANG K,YUAN S Q, et al. 3D particle image velocimetry test of inner flow in a double blade pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2012,25(3):491-497.
- [7] 叶瑞,张发宇,汪家权. 往复式隔板絮凝池内部流场数值模拟分析[J]. 人民长江,2009,40(1):79-81.
- [8] 王君,徐卫光. 往复式隔板絮凝池的优化设计与数值模拟[J]. 给水排水,2014,40(S1):18-21.
- [9] 刘斌,冯其波,匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学仪器,2004,26(5):54-58.
- [10] 赵斌娟,袁寿其,刘厚林,等. 双流道泵内非定常流动数值模拟及粒子图像测速测量[J]. 机械工程学报,2009,45(9):82-88.
- [11] WESTRA R W,BROERSMA L,VAN ANDEL K, et al. PIV measurements and CFD computations of secondary flow in a centrifugal pump impeller[J]. Journal of Fluids Engineering,2010,132(6):061104-061111.

(编辑:刘铁英)